

ОКД

621.318

P-24

**РАСЧЕТ ОБМОТОК
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
МЕХАНИЗМОВ**



ИНФОРМЭЛЕКТРО
Москва · 1970

РАСЧЕТ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

ОТДЕЛЕНИЕ ВНИИЭМ
ПО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

И Н Ф О Р М Э Л Е К Т Р О

Москва

1970

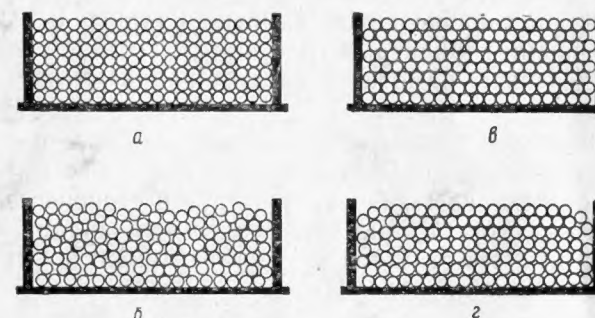
РАСЧЕТ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Способы намотки

Способ намотки провода является, как известно, одним из факторов, определяющих величину коэффициента заполнения обмотки, а следовательно, и ее возможные параметры.

В [1, 3, 5, 9, 13, 17, 20, 24, 26, 29] рассматриваются два способа намотки:

рядовая (рядная, шаговая, «виток к витку») намотка, при которой витки одного ряда (слоя) укладываются плотно друг к другу, а витки каждого вышележащего слоя располагаются точно по вертикали над витками предыдущего (рисунок а);



«дикая» (неравномерная, неровная, беспорядочная, «навалом») намотка, при которой витки наматываются примерно рядами, но без точной укладки, не всегда прилегая друг к другу, а иногда и перекрещиваются (рисунок б).

Число витков рядовой намотки выражается формулой:

$$w = \frac{Q_0}{d_n^2}, \quad (1)$$

где Q_0 — площадь сечения обмотки;
 d_n — диаметр провода с изоляцией.

«Дикая» намотка обеспечивает меньшее заполнение обмоточного пространства; в [8, 13 и 22] указывается, что при рядовой намотке коэффициент заполнения на 12—18% больше, чем при «дикий».

В [2, 4, 7, 8, 11, 14, 16, 22, 25] упоминается шахматная намотка, при которой витки последующего слоя укладываются в промежутки между витками предыдущего (рисунок в). Теоретически такая намотка дает на 15—16% лучшее заполнение, чем рядовая.

Правда в [8 и 25] говорится о трудности практического осуществления строго шахматной намотки, так же как и строго рядовой. Однако в действительности не только практически трудно, но даже и теоретически невозможно строго в шахматном порядке расположить провода из-за разнонаправленности винтовых линий, образуемых смежными слоями обмотки. На это обстоятельство уже неоднократно указывалось в литературе [6, 23 и 31]*.

Как справедливо отмечается в [6, 8, 13, 21 и 25], практически при рядовой намотке провод вышележащего слоя витков частично попадает в углубления между проводами предыдущего слоя.

Таким образом, подразделение упорядоченной намотки на два самостоятельных способа — рядовую и шахматную — является чистой абстракцией; в действительности это лишь два характерных варианта взаимного расположения проводов, имеющих место при упорядоченной намотке, наряду с различными промежуточными вариантами (рисунок г). Именно такую реальную упорядоченную намотку и следует подразумевать под словом «рядовая».

Детальное сопоставление параметров обмотки с вертикальным и шахматным расположением проводов [7] не имеет, таким образом, практического значения. С другой стороны, вполне оправданным является, к примеру, раздельный анализ процессов теплопередачи в обмотке для случаев вертикального и шахматного расположения проводов [15].

Однако и в этом случае следовало, очевидно, принять во внимание одновременное наличие в реальных обмотках этих двух вариантов расположения проводов и соответственно этому свести две полученные кривые зависимости корректирующих коэффициентов в одну.

Проверочные расчеты, проведенные по указанным графикам коэффициентов, подтверждают близкое совпадение результатов,

* Непрерывную шахматную намотку можно в принципе выполнить лишь на замкнутом кольцевом сердечнике, но такой случай в рассматриваемой литературе не имеется в виду.

полученных по обеим кривым. Так, в [15] приведены расчетные данные и результаты экспериментального исследования образцов обмотки, содержащих по несколько сотен витков, расположенных «в шахматном порядке». Однако, если принять, что в указанных образцах все провода смежных слоев расположены по вертикали при том же фактическом коэффициенте заполнения, результаты расчета почти не меняются и также близко совпадают с экспериментально полученными значениями. Следовательно, и с точки зрения тепловых расчетов практически не имеет смысла подразделять обмотки на две самостоятельные разновидности по способу намотки. Этот вывод подтверждается также результатами анализа заполнения катушек [19].

Расчет обмоточных данных

Рассмотрим следующие типичные случаи расчета обмоточных данных катушек электромагнитов при известных размерах обмоточного пространства:

расчет катушки напряжения электромагнита постоянного тока;

расчет катушки тока электромагнита постоянного тока;

расчет катушки напряжения электромагнита переменного тока;

расчет катушки тока электромагнита переменного тока.

В первом случае расчет начинается, как правило, с определения сечения q либо диаметра провода без изоляции d по формулам:

$$q = \rho l_{\text{ср}} \frac{F}{U} \quad (2)$$

или
$$d = 2 \sqrt{\rho D_{\text{ср}} \frac{F}{U}}, \quad (2a)$$

где ρ — удельное сопротивление материала провода;

$l_{\text{ср}}$, $D_{\text{ср}}$ — средняя длина и диаметр витков;

U — напряжение, приложенное к обмотке;

F — заданная н. с. обмотки.

Затем по условиям заполнения обмоточного пространства определяется число витков обмотки. При этом пользуются обычно таблицами или графиками зависимости коэффициента заполнения либо удельного числа витков на единицу сечения обмотки от диаметра провода данной марки при соответствующих условиях намотки. Иногда число витков обмотки находят непосредственным подсчетом числа витков в ряду и числа рядов. Выбор способа расчета числа витков в данном случае существенного значения не имеет.

После этого по общеизвестной формуле определяется сопротивление обмотки и затем она проверяется на нагрев. Методы проверки на нагрев рассматриваются в следующем разделе обзора.

В остальных перечисленных случаях расчет начинается с определения числа витков обмотки. Для катушек тока оно находится по формуле:

$$w = \frac{F}{I_n}, \quad (3)$$

где I_n — номинальный ток катушки.

Для расчета числа витков катушек напряжения переменного тока используется формула, полученная из уравнения равновесия напряжений (активным падением напряжения пренебрегают):

$$w = \frac{\sqrt{2} U}{\omega \Phi_m} = \frac{U}{4,44 f \Phi_m}, \quad (4)$$

где ω — круговая частота тока;

f — частота тока, гц;

Φ_m — амплитудное значение магнитного потока, найденного из условия сцепления его со всеми витками обмотки.

Поскольку формула (4) является приближенной, иногда с целью уточнения в нее вводят поправочный коэффициент, учитывающий соотношение между противо-э. д. с. обмотки и напряжением сети. Величина этого коэффициента колеблется, по данным [2, 25, 28], в пределах от 0,7—0,8 до 0,97—0,98. Введение указанного коэффициента, конечно, не дает гарантии о полной достоверности полученного результата, поэтому и в случае его использования следует проверять найденное по формуле (4) значение w методом последовательных приближений. В [2, 7, 27, 28] даются различные по объему и сложности варианты такой проверки. Общим для них является учет падения напряжения в активном сопротивлении обмотки; кроме того, в некоторых работах рекомендуется учитывать потери в стали и другие факторы.

Большой интерес представляют предложенные в ряде работ уточненные формы выражения (4), учитывающие влияние активного сопротивления обмотки, с целью обойтись без использования громоздкого метода последовательных приближений. Так, в [30] приведено следующее выражение:

$$w = \frac{U}{4,44 f \Phi_m \sqrt{\cos^2 \theta + \left(\sin \theta + \frac{\rho l_{cp}}{Q_0 K_3} \frac{F}{4,44 f \Phi_m} \right)^2}}. \quad (4a)$$

В [24] получено выражение которое можно записать в таком виде:

$$w = \frac{U}{\sqrt{\frac{\rho l_{cp}}{Q_0 K_3} \frac{S_{охл}}{\tau_0} + (\omega \Phi_m)^2}}. \quad (4б)$$

В [14] для уточненного расчета числа витков предлагается выражение:

$$w = \frac{U}{\omega F G \sqrt{1 + \left(\frac{D \delta_0}{a^3 \epsilon^2 \sigma} \right)^2}}. \quad (4в)$$

Выражение (4а), очевидно менее других пригодно для практических расчетов из-за неопределенности величины входящего в него угла потерь в стали θ . Выражение (4б), кроме коэффициента заполнения обмотки K_3 , величиной которого можно задаться с достаточной достоверностью, включает в себя также величину удельной охлаждающей поверхности σ_0 , определяемую как отношение площади поверхности охлаждения катушки $S_{охл}$ к мощности потерь в обмотке.

Каких-либо рекомендаций относительно величины σ_0 для катушек переменного тока в литературе не дается; но, если бы они и имелись, все же представляется нелогичным вести расчет числа витков, задаваясь максимальной допустимой мощностью потерь в меди, а не минимальной возможной, что было бы гораздо целесообразнее.

Ввиду этого применение формулы (4б) для расчетов вряд ли может быть рекомендовано.

В выражение (4в) входят величина рабочего воздушного зазора δ_0 и ряд коэффициентов, определяемых в процессе предварительного расчета электромагнита.

Это выражение, очевидно, вполне пригодно для расчета числа витков, но, конечно, только при условии проведения предварительного расчета по методике, изложенной в [14].

После определения числа витков обмотки выбирается размер провода; при этом исходят, как правило, из условий размещения обмотки в заданном обмоточном пространстве.

В ряде случаев [4, 16, 18, 22, 25, 28] при расчете обмоточных данных рекомендуют исходить из допустимой плотности тока; приемлемость такого подхода будет рассмотрена в следующем разделе.

Для определения размера провода по найденному числу витков и известному сечению окна обмотки предлагаются разные формулы; так, в [5, 10, 13, 14, 17, 25—27, 30] рекомендуют пользоваться формулами вида:

$$q = \frac{Q K}{w} \quad (5)$$

или

$$d = 2 \sqrt{\frac{Q_0 K_3}{\pi w}}. \quad (5a)$$

Поскольку в указанные формулы входит коэффициент заполнения, величина которого в свою очередь зависит от размера провода, расчет приходится вести методом последовательных приближений, задавая вначале ориентировочным значением K_3 (рекомендуется принимать равным 0,5).

В ряде руководств предлагается определять диаметр провода по формулам, не содержащим коэффициента заполнения, например, в [11, 17, 20, 24, 29 и 31] для случая рядовой намотки приводится формула:

$$d_n = \sqrt{\frac{Q_0}{w}}; \quad (1a)$$

в [11, 24, 26 и 29] для «дикий» намотки —

$$d = \sqrt{\frac{1}{\alpha} \left(\frac{Q_0}{w} - \beta \right)}. \quad (6)$$

Формула (1a) получена из выражения (1) для идеальной рядовой намотки; она неточна, так как не учитывает неплотности укладки провода. Формула (6) получена из эмпирической зависимости для неравномерной намотки провода с эмалевой изоляцией [3, 7, 11, 24 и др.]:

$$w = \frac{Q_0}{\alpha d^2 + \beta}. \quad (6a)$$

В [26] приведены значения коэффициентов α и β для наиболее распространенных марок обмоточного провода и разных способов намотки, что значительно расширяет возможности использования формул (6), (6a).

Однако наиболее удобным и целесообразным представляется расчет с помощью таблиц, содержащих значения удельного числа витков на единицу площади сечения обмотки,

$$w_0 = \frac{w}{Q_0}, \quad (7)$$

как это рекомендуется в [2, 6, 9, 21 и др.].

В этом случае по полученной из (7) величине w_0 в соответствующей таблице выбирается размер провода со значением w_0 , ближайшим большим к полученному; для выбранного провода из таблицы берется величина c_0 и определяется сопротивление обмотки по формуле:

$$r = c_0 Q_0 D_{cp}. \quad (8)$$

В случае расчета по данной методике катушки напряжения постоянного тока после определения с помощью формулы (2a)

диаметра провода *, из таблицы находят значения w_0 и c_0 ; число витков обмотки определяется по формуле:

$$w = w_0 Q_0, \quad (7a)$$

сопротивление — по формуле (8).

Для иллюстрации преимуществ рекомендуемой методики расчета рассмотрим еще такой важный для практики случай, когда при заданных размерах обмоточного пространства требуется рассчитать катушку с максимальной н. с. Поскольку величина н. с. ограничивается допустимым нагревом обмотки, задача сводится фактически к расчету обмотки по заданной величине ее сопротивления $r_{зад}$, определяемой из допустимой рассеиваемой мощности катушки.

Соответствующий поставленному условию размер провода находится из таблицы по величине c_0 , определяемой по формуле:

$$c_0 = \frac{r_{зад}}{Q_0 D_{cp}}. \quad (8a)$$

Без использования данного метода такая задача может быть решена только путем подбора провода с многократным подсчетом величин w и r для разных его диаметров.

Проверка на нагрев

Методы проверки обмоток на нагрев можно подразделить на два принципиально различных вида: проверка по плотности тока; проверка по условиям теплоотдачи.

Проверка на нагрев по плотности тока в обмотке может осуществляться двумя методами. Один из них применим только для обмоток, работающих в кратковременном режиме (КРР), при условии, что теплоотдачей обмотки в окружающую среду можно пренебречь. В этом случае [9, 11, 13, 14, 16, 20 и 25] допустимая плотность тока определяется выражением:

$$j_d = \sqrt{\frac{c \gamma}{\rho} \frac{\gamma_d}{t_b}} = K \sqrt{\frac{\gamma_d}{t_b}}, \quad (9)$$

где c — удельная теплоемкость материала провода;

γ — его плотность;

γ_d — допустимое превышение температуры (перегрев) обмотки;

t_b — время ее включенного состояния;

* Поскольку в таблицах приводится также величина сопротивления 1 м провода r_1 , размер провода в данном случае удобнее выбирать по величине

$$r_1 = \frac{U}{I l_{cp}}.$$

K — коэффициент, определяемый свойствами материала провода.

В [11, 14, 16, 25] приводится таблица найденных по выражению (9) значений j_d для односекундного включения; для других длительностей включения табличные значения j_d нужно делить на $\sqrt{t_{в}}$.

В литературе указывается, что пренебрегать теплоотдачей обмотки можно в тех случаях, когда время включенного состояния не превышает нескольких секунд. В [13] это время связывается с постоянной времени нагрева обмотки T и отмечается, что при практических расчетах можно допустить отсутствие теплоотдачи в окружающую среду для катушек при $t_{в} < 0,015 T$, что соответствует для катушек весом 1—2 кг времени $t_{в} \approx 10$ —30 сек.

Такой подход, безусловно, является правильным; однако количественная оценка времени нагрева без заметной теплоотдачи и здесь еще представляется излишне осторожной. Как указано в [28], не внося ошибки, большей 5%, можно пренебрегать отдачей тепла во внешнюю среду при $t_{в} \leq 0,1 T$.

Следовательно, например, для вышеупомянутых катушек весом 1—2 кг методом проверки на нагрев по плотности тока, определяемой выражением (9), можно пользоваться при КРР со временем включенного состояния в пределах до 1—3 мин.

При расчете обмотки для таких условий работы сечение проводника также целесообразно выбирать по плотности тока, определяемой формулой (9).

Второй метод проверки обмоток на нагрев по плотности тока [2, 10, 11, 17, 20, 27, 29] состоит в том, что полученное при расчете обмотки значение плотности тока сопоставляется с приближенными опытными значениями допустимой плотности тока j_d для соответствующего режима работы обмотки.

Так, для продолжительного режима (ПРР) приводится обычно величина j_d в пределах 2—3 или 2—4 а/мм², для повторно-кратковременного (ПКР) 4—6 или 5—12 а/мм², для КРР 8—12, 13—30 или 25—70 а/мм². Показательно, что при этом рекомендуемые значения j_d не связываются с какими-либо параметрами и характеристиками обмотки, обуславливающими ее фактический и допустимый нагрев.

Для оценки возможного влияния этих параметров можно воспользоваться, например, [13] уравнением, связывающим установившийся перегрев обмотки (при постоянном токе) с плотностью тока в ней:

$$\tau = \frac{r K_3 j^2 Q_0}{\alpha_T p_k}, \quad (10)$$

где α_T — коэффициент теплоотдачи с поверхности катушки (усредненный);

p_k — периметр сечения катушки.

Анализируя (10), можно заключить, что при неизменной плотности тока перегрев может изменяться в 1,65 раза вследствие различия в удельном сопротивлении материала провода (медь или алюминий), до 5—7 раз из-за изменения коэффициента заполнения, в несколько раз вследствие зависимости среднего коэффициента теплоотдачи от размеров и конструкции катушки [9, 12] и более чем в 10 раз соответственно изменению отношения $\frac{Q_0}{p_k}$, зависящего от абсолютных размеров катушки и их соотношения.

Кроме этого, при ПКР величина перегрева зависит от относительной продолжительности включения, а при КРР — от времени включения. На нагрев обмоток переменного тока существенное влияние оказывает также тепловой режим магнитопровода. Допустимая величина перегрева зависит от класса изоляции обмотки и температуры окружающей среды.

С другой стороны, неопределенность приводимых в литературе значений допустимой плотности тока дает в соответствии с уравнением (10) двух-, четырехкратную вариацию величины перегрева при неизменных прочих условиях. Эта неопределенность, конечно, обусловлена влиянием на нагрев упомянутых выше факторов и призвана в какой-то степени компенсировать его; но, однако, при неудачном выборе конкретного значения j_d для проверяемой на нагрев обмотки погрешности от неопределенности j_d может суммироваться с погрешностями от неучета влияющих на нагрев факторов.

При этом следует отметить, что фактические величины плотности тока в обмотках электрических аппаратов зачастую выходят за пределы приводимых в литературе допустимых значений. Например, у контакторов постоянного тока значения j достигают 2,5—5,5 а/мм², у реле обычных габаритов — до 8 а/мм², а у миниатюрных реле — до 10 а/мм² и более (эти данные относятся к обмоткам, рассчитанным на ПРР).

Из изложенного следует, что метод проверки на нагрев по эмпирическим значениям допустимой плотности тока не выдерживает никакой критики относительно достоверности его результатов и не может быть рекомендован даже для ориентировочных расчетов.

Пожалуй только для однорядных обмоток из неизолированного проводника большого сечения (шины) этот метод можно все же считать приемлемым, поскольку условия теплоотдачи в данном случае отличаются от типичных для обмоток и приближаются к условиям теплоотдачи шин, имеющих некоторые качественные отличия и количественно в гораздо меньшей степени зависящим от различных факторов.

Соответственно этому и выбор по эмпирическим значениям j_d сечения провода следует считать допустимым только для однорядных обмоток, наматываемых из шины; при этом, очевидно, следует принимать значение j_d , рекомендуемое для соответ-

ствующей шины, с некоторым запасом, учитывающим ухудшение теплоотдачи из-за влияния соседних витков и элементов конструкции катушки. Методы проверки обмоток на нагрев по условиям теплоотдачи базируются на известной формуле Ньютона

$$\nu = \tau \frac{P}{\alpha_{\tau} S_{\text{охл}}} \quad (11)$$

Коэффициент τ [4] учитывает зависимость перегрева от длительности включения обмотки. При ППР $\tau=1$, при КРР $\tau=$

$$= 1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{в}}}{T}\right); \text{ при ПКР } \tau = \frac{1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{в}}}{T}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{ц}}}{T}\right)}, \text{ где } t_{\text{ц}} -$$

время цикла. Обычно в литературе коэффициент τ в формулу (11) не вводится, а для КРР и ПКР рассматриваются коэффициенты допустимой перегрузки по мощности $p_{\text{м}} = \frac{1}{\tau}$ и току

$p_{\text{т}} = \frac{1}{\sqrt{\tau}}$ относительно ПРР. При этом указывается, что если при

КРР $t_{\text{в}} \ll T$, то $\tau \simeq \frac{t_{\text{в}}}{T}$, и если при ПКР $t_{\text{ц}} \ll T$, то $\tau \simeq \text{ПВ}$, т. е. относительно продолжительности включения.

Следует заметить, что для КРР граничным условием малости $t_{\text{в}}$ можно считать, как это было установлено выше, значение $t_{\text{в}} = 0,1 T$, а подстановка в формулу (11) значения $\tau = \frac{t_{\text{в}}}{T}$ приводит к выражению (9).

Таким образом, для КРР при относительно малом времени включенного состояния ($t_{\text{в}} \leq 0,1 T$) проверку обмоток на нагрев, как указывалось ранее, целесообразно проводить по плотности тока, определяемой выражением (9); при большом времени включения ($0,1 T < t_{\text{в}} < 4 T$) — по формуле (11), где $\tau = 1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{в}}}{T}\right)$ и упрощение в виде $\tau = \frac{t_{\text{в}}}{T}$ уже неприемлемо.

Для ПКР условием применимости упрощения $\tau = \text{ПВ}$ в [9] считается $t_{\text{ц}} < T$ в [21] — $t_{\text{в}} \leq 0,25 T$. В [28] приведен график зависимости $\frac{1}{p_{\text{т}}} = f\left(\frac{t_{\text{в}}}{T}\right)$, пользуясь которым нетрудно убедиться, что действительным условием применимости упрощения $\tau = \text{ПВ}$ является неравенство $t_{\text{ц}} < 0,1 T$ (при допустимой погрешности значения τ в пределах 5%), где $t_{\text{ц}}$ — время паузы.

Катушки напряжения электромагнитов переменного тока, как известно, при включении кратковременно обтекаются пусковым током, в несколько раз большим рабочего, что конечно, влияет на их нагрев в КРР и ПКР.

В [14] приведен анализ этого влияния для ПКР и дан график значений $\frac{1}{p_{\text{т}}}$, рассчитанных с его учетом. Как видно из указан-

ного графика в большинстве случаев для таких электромагнитов $p_{\text{т}} < 1$, т. е. в ПКР нагрев их обмоток зачастую больше, чем в ПРР, что не имеет места у электромагнитов постоянного тока (без искусственной форсировки).

Относительно формулы (11) следует также отметить, что величина рассеиваемой катушкой мощности P , элементарно определяемая для электромагнитов постоянного тока, в случае электромагнита переменного тока, как правило, находится труднее из-за наличия потерь в магнитопроводе, которые могут в какой-то своей части рассеиваться через тело катушки. Приводимые в литературе рекомендации по количественному учету составляющей потерь при всей их немногочисленности довольно разноречивы, что обусловлено сложностью процесса теплопередачи в электромагнитах переменного тока.

В [21] рекомендуется потери в стали целиком плюсовать к потерям в катушке, хотя и отмечается, что это дает некоторый запас по нагреву. В [25] P принимается как сумма всех потерь в магнитной системе: в омическом сопротивлении, на гистерзис и вихревые токи в стали, а также в экранирующих витках, если последние расположены непосредственно у катушки. Таким образом, в этих работах пренебрегают непосредственной теплоотдачей магнитопровода в окружающую среду, очевидно всегда имеющей место в реальных конструкциях.

В [28] проверку на нагрев катушек переменного тока рекомендуется вести так же, как и для постоянного тока; здесь принимается, что нагрев магнитопровода за счет потерь в нем в основном лишь затрудняет отвод через сердечник магнитопровода тепла, выделяемого катушкой. Такой подход, по-видимому, будет справедлив только для катушек с хорошей теплоизоляцией от магнитопровода, либо в случае сравнительно малых потерь в последнем*.

Наиболее близкой к истине в общем случае представляется средняя между указанными точка зрения [14]: на основании теоретического и экспериментального анализа процессов теплопередачи рекомендуется при расчете перегрева обмотки наряду с активными потерями в проводе катушки учитывать и потери в стали сердечника, охватываемого катушкой, а также потери в экранирующих витках, если последние располагаются на магнитопроводе внутри катушки или в непосредственной близости от нее.

В [8] для определения перегрева катушки переменного тока при практических расчетах дается следующее равенство:

$$\nu = K_1 p_{\text{к}} + K_2 p_{\text{м}}, \quad (12)$$

* Наряду с изложенным в [25] указывается, что температура магнитопровода несколько ниже температуры намотки, поэтому для упрощения считают, что магнитопровод не подогревает катушку; в [28] указывается возможность подогревания катушки от сердечника.

где p_K и p_M — потери, выделяющиеся в катушке и в магнитопроводе;

K_1 и K_2 — эмпирические коэффициенты.

Для катушки контакторов КТ-2 приводятся следующие значения коэффициентов: $K_1=4,2$; $K_2=1,1$. Соотношение величин этих коэффициентов наглядно показывает влияние потерь магнитопровода на нагрев катушки.

Знаменатель формулы (11), представляющий собой произведение коэффициента теплоотдачи на площадь охлаждающей поверхности катушки, также имеет различные конкретные выражения в работах разных авторов.

Определение активной охлаждающей поверхности катушек электромагнитов постоянного и переменного тока имеет свои особенности.

Для катушек постоянного тока в некоторых работах [5 и 13] рекомендуется учитывать при расчете перегрева все поверхности катушки: наружную боковую, торцевые и внутреннюю; поскольку условия теплоотдачи с этих поверхностей различны, при расчете нагрева предлагают пользоваться условным средним коэффициентом теплоотдачи, отнесенным ко всей поверхности катушки.

Однако в подавляющем большинстве работ для катушек постоянного тока, обычно развитых в длину, влияние на теплоотдачу торцевых поверхностей не учитывают, считая его незначительным из-за относительно малых размеров этих поверхностей, а также затрудненности теплоотдачи из-за наличия на них обычно увеличенного слоя изоляции и экранирующего влияния деталей магнитной системы. Торцевые поверхности необходимо учитывать только в тех случаях [3, 7, 9, 21, 25], когда диаметр катушки больше ее длины или когда катушка наматывается на металлический каркас.

В таблице приведены значения наружной боковой S_6 , внутренней S_B и торцевых S_T поверхностей цилиндрической катушки, выраженные в процентах от общей ее поверхности. Эти значения подсчитаны для величин отношения внутреннего диаметра катушки к наружному X и высоты катушки к ее наружному диаметру Y , лежащих в пределах, обычно имеющих место в реальных конструкциях, за исключением величины $Y=0,75$, не характерной для катушек постоянного тока и взятой лишь для сопоставления.

Из таблицы видно, что при практически применяемых соотношениях размеров катушек постоянного тока их торцевые поверхности не превышают 10—20% суммарной площади поверхности катушки; это подтверждает приемлемость выше указанного допущения.

Отдача тепла с наружной поверхности катушки осуществляется в основном путем конвекции, с внутренней — за счет теплопроводности; различие законов теплопередачи затрудняет за-

X	Y	$s_6, \%$	$s_B, \%$	$s_T, \%$
0,35 0,5 0,65	0,75	52 50 49	13 25 32	30 25 19
0,35 0,5 0,65	1	55 53 52	20 27 33	25 20 15
0,35 0,5 0,65	1,5	61 57 54	21 29 35	18 14 11
0,35 0,5 0,65	3	67 61 57	23 31 37	10 8 6

дачу усреднения коэффициента теплоотдачи для этих поверхностей*.

Обычно используемый способ решения этой задачи — экспериментальное определение условного среднего значения α_T по величинам рассеиваемой мощности учитываемой активной охлаждающей поверхности

$$s_{\text{охл}} = s_6 + s_B \quad (13)$$

и среднего по объему обмотки перегрева, определяемого методом сопротивления.

Получаемое таким путем значение α_T зависит от целого ряда факторов; в [4, 9, 14, 21, 25, 30] приведены зависимости α_T от температуры перегрева, расчетной охлаждающей поверхности и других факторов; при этом, как правило, указывается два значения α_T — для катушек с хорошей и плохой теплопроводностью к сердечнику.

Ясно, что понятия «хорошего» и «плохого» теплового контакта с магнитопроводом не исчерпывают всего разнообразия вариантов конструктивного исполнения катушек, определяющего степень их теплового контакта с сердечником. Кроме того, при таком подходе не учитывается соотношение между величинами наружной и внутренней поверхностей, оказывающее существенное влияние на эквивалентное усредненное значение α_T .

Эти недостатки устраняются в случае, если расчет нагрева ведется по приведенной охлаждающей поверхности [12]:

$$s_{\text{охл}} = s_6 + \beta_T s_B, \quad (13a)$$

где β_T — коэффициент, учитывающий влияние конструкции ка-

* У некоторых электромагнитов, например втяжных с магнитной системой броневых типа, теплоотдача происходит несколько иначе; пример расчета такого электромагнита с определением эквивалентной охлаждающей поверхности приведен в [16].

тушки на эффективность теплоотдачи с ее внутренней поверхности по отношению к наружной [8, 11, 14, 16, 25].

Разумеется, при $\beta_T \approx 1$ (например, при $\beta_T = 0,9—1,3$ [9]) активная охлаждающая поверхность может без существенной ошибки определяться по равенству (13), как это рекомендуется в [9, 22 и 30].

У каркасных катушек, имеющих изоляционный каркас из плохо теплопроводящего материала, как указано в [14, 16, 28], теплоотдача через внутреннюю поверхность пренебрежимо мала, т. е. $\beta_T \approx 0$ и активной охлаждающей поверхностью является фактически одна боковая поверхность:

$$S_{\text{охл}} = S_6. \quad (13б)$$

В [1, 20, 24, 31] последнее равенство используется без всяких оговорок относительно конструкции катушки, т. е. теплоотдача с внутренней поверхности вообще не учитывается.

Поскольку площадь внутренней поверхности в первом приближении равна примерно половине площади наружной боковой поверхности, погрешность от пренебрежения величиной $S_в$ при $\beta_T \geq 1$ становится весьма существенной.

Однако использование равенства (13б) приводит к простому методу ориентировочной оценки нагрева обмотки по величине удельной боковой поверхности катушки на 1 Вт рассеиваемой ею мощности:

$$\sigma_0 = \frac{S_6}{P} = \frac{\tau}{\alpha_T \nu}. \quad (11а)$$

Этот метод проверки на нагрев довольно часто рекомендуется в литературе и имеет разные трактовки.

Так, в [8 и 25] приводятся таблицы опытных значений σ_0 для каркасных катушек; эти значения варьируют в пределах 9—14 $\text{см}^2/\text{Вт}$ в зависимости от вида изоляции провода и пропитки обмотки, а также от соотношения между длиной катушки и ее толщиной. Здесь не оговорен, правда, материал каркаса но следует считать, что имеются в виду катушки на изоляционном каркасе. Для таких катушек, как указывалось выше, можно принимать во внимание только боковую охлаждающую поверхность. Учитываемое в [8 и 25] отношение длины катушки к толщине численно равно отношению суммы боковой и внутренней поверхностей к торцевым, т. е. здесь принимается во внимание и влияние торцов. Таким образом, можно считать, что приведенные в указанных таблицах данные обеспечивают сравнительно точную проверку на нагрев катушек, намотанных на изоляционный каркас.

В [28] для катушек на изоляционном каркасе значения σ_0 даны в пределах 8—12 $\text{см}^2/\text{Вт}$ в зависимости от соотношения между длиной катушки и ее наружным диаметром. Следует заметить, что последнее соотношение с меньшей точностью выра-

жает относительную поверхность торцов, чем соотношение между длиной и толщиной катушки; однако, поскольку влияние теплоотдачи с внутренней и торцевых поверхностей для рассматриваемых катушек невелико, это не имеет существенного значения.

В [3, 11, 24] эти же значения σ_0 приводятся безотносительно к конструкции катушки, а в [1, 2, 17, 20], кроме того, и без дифференциации в зависимости от соотношения ее размеров.

В соответствии с указанным выше проверка на нагрев по этим значениям σ_0 катушек с $\beta_T \geq 1$ будет весьма неточной.

Исходя из изложенного выше можно рекомендовать для повышения точности упрощенной проверки на нагрев катушек с $\beta_T \geq 1$ пользоваться откорректированными значениями σ_0 , приближенно учитывающими влияние теплоотдачи с внутренней поверхности.

Исходя из примерного диапазона соотношений $\frac{S_в}{S_6}$ в соответствии с таблицей для бескаркасных бандажированных катушек ($\beta_T = 0,9$) приводимые в литературе значения σ_0 следует уменьшить в 1,3—1,6 раза, т. е. в среднем с 10 до 7 $\text{см}^2/\text{Вт}$; для катушек на металлической гильзе ($\beta_T = 1,7$) — в 1,6—2,1 раза, т. е. в среднем до 5,5 $\text{см}^2/\text{Вт}$; для катушек, намотанных на сердечник ($\beta_T = 2,4$), — в 1,8—2,6 раза, т. е. в среднем до 4,5 $\text{см}^2/\text{Вт}$.

Для катушек электромагнитов переменного тока отличие в определении активной охлаждающей поверхности состоит в том, что ввиду нагрева магнитопровода собственными потерями, внутреннюю поверхность катушки, независимо от конструкции последней, не учитывают как охлаждающую. С другой стороны, поскольку такие катушки зачастую имеют малую высоту и сравнительно развитую поверхность торцов, участие последней в теплоотдаче здесь уже нужно учитывать, но, конечно, в том случае, если катушка намотана не на изоляционном каркасе [14, 25, 28].

Рекомендуемый в [8, 30] неучет теплоотдачи с торцевых поверхностей для катушек переменного тока, например бескаркасной конструкции, таким образом, нельзя считать обоснованным.

Заключение

Данный обзор опубликован в расчете на то, что он будет способствовать устранению некоторых неверных представлений и методов расчета.

Например, в разделе «Способы намотки» приведены перечни работ, где в качестве реально существующих приводятся невыполнимые способы непрерывной намотки — шахматная и рядовая с расположением витков по вертикали по всему объему

обмотки. Эти перечни можно еще значительно пополнить, в том числе и изданиями последних лет (Г. А. Бокман и И. С. Пузевский «Конструкция и технология производства электрических машин и аппаратов» М., изд-во «Высшая школа», 1968 г. и др.). Хочется выразить надежду на то, что во всех последующих изданиях вопрос о способах намотки будет рассматриваться на основе правильных физических представлений, уже неоднократно освещавшихся в литературе.

Обоснованная в последнем разделе непригодность метода проверки на нагрев по эмпирическим значениям допустимой плотности тока также уже отмечалась в литературе (Ю. И. Акимцев.—«Вестник электропромышленности», 1961, № 11; С. П. Колосов. Элементы авиационных автоматических устройств. М., «Оборонгиз», 1963, стр. 448), и все же указанный метод рекомендуется и в некоторых более поздних работах.

Этого ни в коем случае не следует допускать в будущем.

Представляется также весьма целесообразным в последующих изданиях уточнить пределы применимости проверки на нагрев по плотности тока в КРР и упрощенного выражения коэффициента перегрузки в ПКР, исходя из выводов, полученных в данном обзоре.

Литература

1. Агейкин Д. И., Колосов С. П. и Удалов Н. П. Руководство по проектированию элементов автоматики, вып. 1, М., Оборонгиз, 1957.
2. Аранович Б. и И. и Шамрай Б. В. Электромагнитные устройства автоматики М., «Энергия», 1965.
3. Бабилов М. А. Электрические аппараты, ч. 1, М., Госэнергоиздат, 1951.
4. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф., Гордон А. В. и Ларионов А. Н. Проектирование электрических аппаратов авиационного электрооборудования. М., Оборонгиз, 1962.
5. Баталов Н. М. и Петров Б. П. Тяговые электрические аппараты, М., Госэнергоиздат, 1961.
6. Бугаев Г. А. Намотка катушек проводами двух различных диаметров.—«Вестник электропромышленности», 1959, № 1.
7. Буйлов А. Я. Основы электроаппаратостроения. М., Госэнергоиздат, 1946.
8. Вайсман Х. Г. Электрическая аппаратура управления судовыми электродвигателями. М., «Морской транспорт», 1958.
9. Витенберг М. И. Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи. М., «Энергия», 1966.
10. Геращенко Г. В. Справочное руководство по изготовлению катушек электроаппаратов. М., Госэнергоиздат, 1958.
11. Гордон А. В. и Сливинская А. Г. Электромагниты постоянного тока. М., Госэнергоиздат, 1960.
12. Кобленц М. Г. Определение перегревов катушек контакторов постоянного тока по приведенной удельной мощности.—«Вестник электропромышленности», 1947, № 7.
13. Кричко А. И. Тяговая электроаппаратура. М., Госэнергоиздат, 1956.
14. Любчик М. А. Расчет и проектирование электромагнитов постоянного и переменного тока. М., Госэнергоиздат, 1959.

15. Любчик М. А. Расчет эквивалентного коэффициента теплопроводности обмоток электрических устройств. М., Известия вузов. «Электромеханика», 1958, № 2.

16. Любчик М. А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. М., «Энергия», 1968.

17. Миловзоров В. П. Электромагнитная техника. М., «Высшая школа», 1966.

18. Михайлов В. В. Расчет и конструирование высоковольтной аппаратуры. М., Госэнергоиздат, 1955.

19. Парнес М. Г. Анализ коэффициента заполнения электрических катушек.—«Электротехника», 1968, № 6.

20. Рабинович Л. В. Электроавтоматика авиационных электромеханических установок. М., Оборонгиз, 1957.

21. Ротерс. Электромагнитные механизмы. М., Госэнергоиздат, 1949 (перевод с англ.).

22. Сачиро Д. Н. Авиационные электрические аппараты и механизмы. М., Оборонгиз, 1962.

23. Сахаров П. В. Технология аппаратостроения, ч. 1, М., Госэнергоиздат, 1956.

24. Сотсков Б. С. Основы расчета и проектирования электромеханических элементов автоматических устройств. М., «Энергия», 1965.

25. Ступель Ф. А. Электромеханические реле, изд-во ХГУ, 1956.

26. Фабрикант В. Л. Теория обмоток реле переменного тока. М., Госэнергоиздат, 1958.

27. Черторицкий К. В. и Крашенников И. И. Аппаратура управления электроприводами. Держтехиздат, УРСР, 1958.

28. Чунихин А. А. Электрические аппараты. М., «Энергия», 1967.

29. Шлядин В. М. Основы автоматики. М., Госэнергоиздат, 1958.

30. Электротехнический справочник, колл. авторов МЭИ, т. III, кн. 1, М., «Энергия», 1966.

31. Яссе Э. Электромагниты. М., Энергоиздат, 1934 (перевод с нем.).

(ТС-7-1832)

Составитель *Бугаев Г. А.*
Редакторы: *Марченко Н. Л., Филановская В. С.*
Технич. редактор *Полокская Е. И.*
Корректор *Сигалова Л. Л.*

Т-09589.	К печати 10/VII-70 г.	Объем печ. л. 1,25.	Уч.-изд. л. 1,12
Формат бумаги 60×90 ¹ / ₁₆ .	Тираж 2200.	Цена 11 к.	Зак. 650

Отделение ВНИИЭМ по научно-технической информации в электротехнике
(Информэлектро)
Москва, Е-123, 2-й Плехановский пер., 12